



TITLE:

Numerical simulation of the tsunami-induced electromagnetic field using a time-domain finite element method: application to the 2011 Tohoku Earthquake tsunami(Digest_要約)

AUTHOR(S):

Minami, Takuto

CITATION:

Minami, Takuto. Numerical simulation of the tsunami-induced electromagnetic field using a time-domain finite element method: application to the 2011 Tohoku Earthquake tsunami. 京都大学, 2014, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2014-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18085>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要約は2014-04-01に公開; 許諾条件により要旨は2014-04-01に公開; 許諾条件により本文は2018-11-01に公開

時間領域有限要素法を用いた津波起源電磁場の数値シミュレーション:

2011 年東北地方太平洋沖地震津波への応用

南 拓人

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

良導体である海水が地球主磁場中を運動すると、ダイナモ効果が生じ電磁場が誘導される。この効果は海洋ダイナモ効果として古くから（例えば Faraday, 1832）よく知られており、主に潮汐や準定常海流などの長周期現象について研究が行われてきた。しかし近年、海底電磁場観測技術の進展により、津波も顕著な海洋ダイナモ効果を伴うことが明らかになった。Toh et al. (2011) は、2006 年及び 2007 年千島列島沖地震津波により誘導された電磁場を、北西太平洋の海底で実際に観測した例を報告した。Toh et al. (2011) 以降現在まで、多くの津波起因の海洋ダイナモ現象例（以下、津波ダイナモ現象）が報告されている（e.g., Manoj et al. 2011; Suetsugu et al., 2012; Ichihara et al., 2013）。これらの津波ダイナモ現象を説明するために、先行研究では主に周波数領域の解析解（e.g., Tyler, 2005）が用いられてきた。しかし、解析解では現実の海底地形や海底下の電気伝導度構造を含めることが難しく、一方、解析解に替わるべき数値計算による津波ダイナモ研究の例は非常に少ない。数少ない数値計算例である Manoj et al. (2010) では、全地球的な誘導現象を解析するコードを使用しており解像度が $1^\circ \times 1^\circ$ と低いため、観測データの再現はできていない。さらに、これまで報告された津波ダイナモ現象に関する解析解、及び、Manoj et al. (2010)を含めた数値的な研究は、その全てが周波数領域の研究であるため、津波の生成過程や津波の第一波に関わる過渡的性質を再現することが困難であった。

そこで本研究では、時間領域有限要素法に基づく二次元津波ダイナモシミュレーションコードを新たに開発し、2011 年東北地方太平洋沖地震津波が北西太平洋に誘導した磁場変化の再現を試みた。本研究では数値計算用のメッシュに三角形要素を採用し、現実的な海底地形を表現できるようになったことに加え、任意の海底下電気伝導度構造を計算に含めることを可能にした。本研究で開発した二次元シミュレーションコードは、次の二つのステップから構成される。第一ステップでは、非圧縮と渦無しを仮定した力学的な津波シミュレーションを行い、津波による海水速度場の時間発展を計算する。二つ目のステップでは、得られた速度場を入力とした電磁場シミュレーションを行い、津波によって誘導される電磁場を計算した。両ステップにおいて、同じ三角形要素のメッ

シュを用いていることで、二つのシミュレーションにおいて自己無撞着な結果が得られるようにしたことが本研究の大きな特徴の一つである。開発したシミュレーションコードは、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波が北西太平洋の海底で引き起こした磁場水平成分及び鉛直成分の約 3 nT の変動ピークを再現することに成功した。また、津波第一波が到来する約 5 分前に、津波進行方向の磁場水平成分が約 1 nT 変動していたことが明らかとなった。津波発生時には弱い外部磁場擾乱が起きていたが、津波とは無関係の時間帯のデータを用いることにより、磁場水平成分に見られた先行現象は外部磁場擾乱によるものではないことも示された。従って、この津波に先行して発生する磁場水平成分の変化（以下、initial rise）は、津波の早期警戒／予測への応用可能性がある重要な現象とすることができる。さらに本研究では、孤立波を用いた順計算により、海底下の電気伝導度が 0.1 S/m を越えると initial rise が現れないことも明らかにした。この結果は、海底下が十分絶縁的であれば、initial rise を津波の早期警戒／予測に応用可能であることを示唆している。また、この孤立波を用いた計算により、海底下の電気伝導度が大きくなるにつれ、津波到来後に現れる海底磁場の水平成分の変動ピークは大きく、他方、津波到来と同時に現れる磁場鉛直成分のピークが小さくなることが明らかとなった。この結果は、磁場水平成分と鉛直成分の振幅比から、海底下の電気伝導度構造を推定するという新しい手法の可能性を示唆している。また、海底下の電気伝導度の上昇と共にその振幅が減少する磁場水平成分の initial rise は、津波第一波に続く水平成分のピークが大きくなる現象とは対照的であるため、津波ダイナモ現象の重要な特徴といえる。今後、異なる津波現象に対する事例解析や、initial rise の水深や海底地形との関係を明らかにすることにより、initial rise の津波早期警戒／予測への応用可能性を探るとともに、その物理的な性質を明らかにすることが重要と考えられる。

また本研究では、解析解に基づいた理論と孤立波を扱った数値計算との比較により、津波ダイナモ現象が磁場の誘導方程式における拡散項の大小で分類できることも明らかにした。津波ダイナモ現象の場合、拡散項の大小は、主に水深によって変化する。水深の浅い海域では、拡散項が大きくなる一方、自己誘導の影響が小さくなるため、海水運動 \mathbf{v} と地球主磁場 \mathbf{F} とのカップリング ($\mathbf{v} \times \mathbf{F}$) によって生じる磁場は、ほとんど減衰されることなくそのまま海底や海面で観測される。この場合の津波ダイナモ現象は、アンペールの法則のみによっても現象の説明がほぼ可能である。一方、水深が深くなると、拡散項が小さく、同時に自己誘導の効果が大きくなるため磁場凍結が近似的に成り立つものの、 $\mathbf{v} \times \mathbf{F}$ によって生じた磁場は大きく減衰される。特に、水深が 5000m を越えた海域では、 $\mathbf{v} \times \mathbf{F}$ によって生じた磁場に比べて観測される海底磁場変化は、振幅にして七割以下、位相角にして 70 度以上遅れることとなる。本研究のシミュレーションによ

って観測結果を再現した北西太平洋の観測点では、水深が約 5600m であったため、自己誘導が支配的な現象を観測していたものと判断できる。このことは、観測された磁場鉛直成分の変化波形が、電磁場観測点最寄りの海底圧力変化（＝波高変化）と位相を含めて酷似していたことと整合する。さらに、解析解を用いた理論計算では、津波波高を 1m に固定した場合、津波の引き起こす磁場の振幅は、水深に対する依存性が異なる拡散項と自己誘導項とのバランスにより、水深 2000m 付近で最大になることが明らかとなった。これまで観測例の少ない津波ダイナモ現象に対し、各海域において期待される津波ダイナモ効果の振幅と位相を水深別に示した本研究の意義は大きく、今後、津波ダイナモ現象の観測計画や、津波ダイナモ効果の防災／減災への応用可能性を論じる際に、本研究の結果が応用されることが期待される。